

# 数字孪生关键技术及体系架构

## Key Technology and Architecture of Digital Twin

王巍,刘永生,廖军,蔡一欣(中国联通研究院,北京 100048)

Wang Wei,Liu Yongsheng,Liao Jun,Cai Yixin(China Unicom Research Institute,Beijing 100048,China)

### 摘要:

数字孪生以各领域日益庞大的数据为基本要素,借助发展迅速的建模仿真、人工智能、虚拟现实等先进技术,构建物理实体在虚拟空间中的数字孪生体,实现对物理实体的数字化管控与优化,开拓了企业数字化转型的可行思路。首先介绍了数字孪生的演进与价值,然后给出了数字孪生典型特征及其体系架构,并基于该架构介绍了多项数字孪生关键技术,最后对数字孪生进行了展望,包括其面临的挑战与未来发展趋势。

### 关键词:

数字孪生;建模仿真;数字化转型

doi:10.12045/j.issn.1007-3043.2021.08.003

文章编号:1007-3043(2021)08-0010-05

中图分类号:TP391

文献标识码:A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Abstract:

The digital twin takes the increasingly larger data in various fields as the basic element and builds a digital twin of physical entity in virtual space with the help of rapidly developing modeling simulation, artificial intelligence, virtual reality and other advanced technologies to realize intelligent control and optimization of physical entity, which opens up a feasible idea for digital transformation of enterprises. Firstly, the development and value of the digital twin is introduced. Then the typical characteristics and architecture of the digital twin are given. Last an outlook on the digital twin is presented, including its challenges and trends.

### Keywords:

Digital twin; Modeling and simulation; Digital transformation

引用格式:王巍,刘永生,廖军,等.数字孪生关键技术及体系架构[J].邮电设计技术,2021(8):10-14.

## 1 概述

数字孪生中“孪生”的基本思想最早起源于上个世纪美国国家航空航天局(NASA)的阿波罗计划,通过留在地球上的航天器对发射到太空的航天器进行工作状态的仿真模拟,进而辅助航天员完成决策,明显减少了各种操作结果的未知性。

“数字孪生”一词首次出现于2009年美国空军研究实验室提出的“机身数字孪生体”概念中,而“数字孪生”作为独立概念首次出现则是在2010年NASA的

2份技术报告中,其被定义为集成多物理量、多尺度、多概率的系统或飞行器仿真过程。此后,数字孪生正式进入公众的视野,也开始得到各研究领域的重视。

2012年,NASA指出数字孪生是驱动未来飞行器发展的关键技术之一;2013年,NASA将数字孪生列入“全球科技愿景”;2017年佐治亚理工大学首次提出数字孪生城市,2018年中国信通院发布了《数字孪生城市研究报告》;从2018年起,ISO、IEC、IEEE三大标准化组织也开始着手数字孪生相关标准化工作。

数字孪生目前没有统一的理论体系,自其诞生以来,各研究与应用领域对其提出了多种定义,如表1所示。

收稿日期:2021-07-05

表1 数字孪生定义

时间	提出者	阶段	定义
2009	美国空军研究实验室	“孪生”名词首次出现	孪生体是一个由数据、模型和分析工具构成的集成系统。该系统不仅可以在整个生命周期内表达飞机机身,并可以依据非确定信息对整个机队和单架机身进行决策,包括当前诊断和未来预测 <sup>[3]</sup>
2010	NASA	“数字孪生”概念首次提出	数字孪生体是一个集成了多物理场、多尺度和概率仿真的数字飞行器(或系统),它可以通过逼真物理模型、实时传感器和服役历史来反映真实飞行器的实际状况
2017	佐治亚理工大学	“数字孪生城市”首次提出	智慧城市数字孪生体是一个智能的、支持物联网、数据丰富的城市虚拟平台,可用于复制和模拟真实城市中发生的变化,以提升城市的弹性、可持续发展和宜居性
2019	ISO	标准化组织开展研究	数字孪生体是现实事物或过程具有特定目的的数字化表达,并通过适当频率的同步使物理实例与数字实例之间趋向一致
2019	中国电子信息产业发展研究院	国内组织开展研究	数字孪生是综合运用感知、计算、建模等信息技术,通过软件定义,对物理空间进行描述、诊断、预测、决策,进而实现物理空间与赛博空间的交互映射 <sup>[4]</sup>

## 2 数字孪生的价值

数字孪生自应用以来,在产业、商业、社会等方面体现出了其重要的价值。

a) 产业价值方面,构建全产业链的数字孪生体能够促进产业向制造与服务融合发展的新型产业形态转型,即从市场需求、用户沟通、产品设计、产品制造、物流供应、维保服务等全产业链出发构建数字孪生体,使传统产业具备定制化生产能力,实现更为敏捷和柔性的商业模式;而构建产品全生命周期的数字孪生体,有助于建立产品从研发、仿真、制造到使用的闭环体系,加快产品研发和迭代升级,进一步推动产业的发展。

b) 商业价值方面,随着数字孪生技术得到各领域认可,很多科技企业已经着手研发数字孪生技术并推出了相关产品,这些产品在落地应用中不断升级优化,逐渐满足市场客户的实际需求,为企业带来了可观的经济效益,同时也促进了更多企业共同推动数字孪生产品的商业化;另一方面,企业构建产品全生命周期的数字孪生体,有助于改善产品设计、优化生产流程、快速定位问题,实现提高产品质量、降低生产成本、提升生产效率等目标,其也是数字孪生商业价值的重要体现。

c) 社会价值方面,数字孪生能够推动社会数字经济的发展。数字经济是继农业经济、工业经济之后,

随着信息技术革命发展而产生的一种新经济形态,其核心在于数据驱动发展,构建实体经济的数字孪生体,对数据整合及利用,进行模拟决策、资源配置、市场发掘等仿真与复现,在提高劳动生产率、发掘经济新增长点、实现经济可持续增长等方面发挥着重要作用。

## 3 数字孪生体系架构

数字孪生具备以下几个典型特征。

a) 数字化保真。“数字化”指数字孪生体是对物理实体进行数字化而构建的模型。“保真”指数字孪生体需要具备与物理实体高度的接近性,即物理实体的各项指标能够真实地呈现在数字孪生体中,而数字孪生体的变化也能够真实反映物理实体的变化。

b) 实时交互。“实时”指数字孪生体所处状态是物理实体状态的实时虚拟映射。“交互”指在实时性的前提下,数字孪生体与物理实体之间存在数据及指令相互流动的管道。

c) 先知先觉。“先知”指在根据物理实体的各项真实数据,通过数字孪生体进行仿真,实现对物理实体未来状态的预测,预先知晓未来状态能够辅助用户做出更合理的决策。“先觉”指根据物理实体的实时运行状态,通过数字孪生体进行监测,实现对系统不稳定状态的预测,预先觉察即将可能发生的不稳定状态,使用户更从容地处理该问题。

d) 共生共智。“共生”指数字孪生体与物理实体是同步构建的,且二者在系统的全生命周期中相互依存。“共智”一方面指单个数字孪生系统内部各构成之间共享智慧(即数据、算法等),另一方面指多个数字孪生系统构成的高层次数字孪生系统内部各构成之间同样共享智慧。

根据数字孪生的典型特征,可以提出一种数字孪生的体系架构,如图1所示。

感知层:感知层主要包括物理实体中搭载先进物联网技术的各类新型基础设施。

数据层:数据层主要包括保证运算准确性的高精度的数据采集、保证交互实时性的高速率数据传输、保证存取可靠性的全生命周期数据管理。

运算层:运算层是数字孪生体的核心,其充分借助各项先进关键技术实现对下层数据的利用,以及对上层功能的支撑。

功能层:功能层是数字孪生体的直接价值体现,

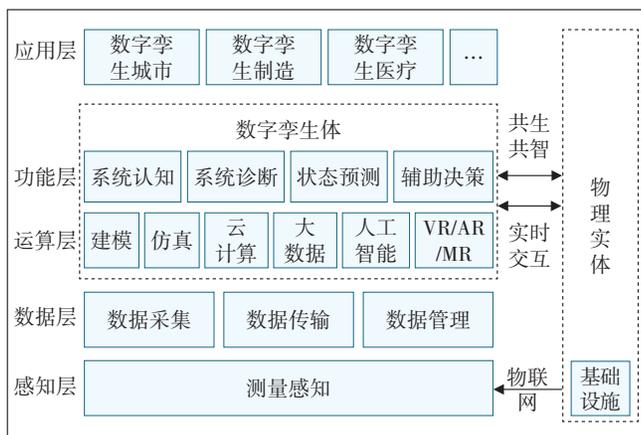


图1 数字孪生体系架构

实现系统认知、系统诊断、状态预测、辅助决策功能。系统认知一方面是指数字孪生体能够真实描述及呈现物理实体的状态,另一方面指数字孪生体在感知及运算之上还具备自主分析决策能力,后者属于更高层级的功能,是智能化系统发展的目标与趋势;系统诊断是指数字孪生体实时监测系统,能够判断即将发生的不稳定状态,即“先觉”;状态预测只是数字孪生体能够根据系统运行数据,对物理实体未来的状态进行预测,即“先知”;辅助决策是指能够根据数字孪生体所呈现、诊断及预测的结果对系统运行过程中各项决策提供参考。

应用层:应用层是面向各类场景的数字孪生体的最终价值体现,具体表现为不同行业的各种产品,能够明显推动各行各业的数字化转型,目前数字孪生已经应用到了智慧城市、智慧工业、智慧医疗、车联网等多种领域,尤以数字孪生城市、数字孪生制造发展最为成熟。

## 4 数字孪生关键技术

根据数字孪生体系架构,数字孪生包含了以下各项关键技术。

### 4.1 建模

建模是创建数字孪生体的核心技术,也是数字孪生体进行上层操作的基础。建模不仅包括对物理实体的几何结构和外形进行三维建模,还包括对物理实体本身的运行机理、内外部接口、软件与控制算法等信息进行全数字化建模。数字孪生建模具有较强的专用特性,即不同物理实体的数字孪生模型千差万别。目前不同领域的数字孪生建模主要借助CAD、Matlab、Revit、CATIA等软件实现,前两者主要面向基

础建模,Revit主要面向建筑信息模型(Building Information Modeling,BIM)建模,CATIA则是面向更高层次的产品生命周期管理(Product Lifecycle Management,PLM)。

### 4.2 仿真

仿真是数字孪生模型验证的关键方法。仿真和建模是一对伴生体,如果说建模是对物理实体理解的模型化,那仿真就是验证和确认这种理解的正确性和有效性的工具。仿真是将具备确定性规律和完整机理的模型以软件的方式来模拟物理实体的一种技术。在建模正确且感知数据完整的前提下,仿真可以基本正确地反映物理实体一定时段内的状态。

仿真起源于工业领域,近年来,随着工业4.0和智能制造等新一轮工业革命的兴起,仿真软件开始与传统制造技术及各类新兴技术结合,在研发设计、生产制造、试验运维各环节发挥了重要的作用。

### 4.3 云计算与边缘计算

云计算为数字孪生提供重要计算基础设施。云计算采用分布式计算等技术,集成强大的硬件、软件、网络等资源,为用户提供便捷的网络访问,用户按需计费的、可配置的计算资源共享池,借助各类应用及服务完成目标功能的实现,且无需关心功能实现方式,显著提升了用户开展各类业务的效率。云计算根据网络结构可分为私有云、公有云、混合云和专有云等,根据服务层次可分为基础设施即服务(IaaS)、平台即服务(PaaS)和软件即服务(SaaS)。

边缘计算是将云计算的各类计算资源配置到更贴近用户侧的边缘,即计算可以在如智能手机等移动设备、边缘服务器、智能家居、摄像头等靠近数据源的终端上完成,从而减少与云端之间的传输,降低服务时延,节省网络带宽,减少安全和隐私问题。

云计算和边缘计算通过以云边端协同的形式为数字孪生提供分布式计算基础。在终端采集数据后,将一些小规模局部数据留在边缘端进行轻量的机器学习及仿真,只将大规模整体数据回传到中心云端进行大数据分析及深度学习训练。对高层次的数字孪生系统,这种云边端协同的形式更能够满足系统的时效、容量和算力的需求,即将各个数字孪生体靠近对应的物理实体进行部署,完成一些具有时效性或轻度的功能,同时将所有边缘侧的数据及计算结果回传至数字孪生总控中心,进行整个数字孪生系统的统一存储、管理及调度。

#### 4.4 大数据与人工智能

大数据与人工智能是数字孪生体实现认知、诊断、预测、决策各项功能的主要技术支撑。大数据的特征是数据体量庞大,数据类型繁多,数据实时在线,数据价值密度低但商业价值高,传统的大数据相关技术主要围绕数据的采集、整理、传输、存储、分析、呈现、应用等,但是随着近年来各行业领域数据的爆发式增长,大数据开始需求更高性能的算法支撑对其进行分析处理,而正是这些需求促成了人工智能技术的诸多发展突破,二者可以说是相伴而生,人工智能需要大量的数据作为预测与决策的基础,大数据需要人工智能技术进行数据的价值化操作。目前,人工智能已经发展出更高层级的强化学习、深度学习等技术,能够满足大规模数据相关的训练、预测及推理工作需求。

在数字孪生系统中,数字孪生体会感知大量来自物理实体的实时数据,借助各类人工智能算法,数字孪生体可以训练出面向不同需求场景的模型,完成后续的诊断、预测及决策任务,甚至在物理机理不明确、输入数据不完善的情况下也能够实现对未来状态的预测,使得数字孪生体具备“先知先觉”的能力。

#### 4.5 物联网

物联网是承载数字孪生体数据流的重要工具。物联网通过各类信息感知技术及设备,实时采集监控对象的位置、声、光、电、热等数据并通过网络进行回传,实现物与物、物与人的泛在连接,完成对监控对象的智能化识别、感知与管控。

物联网能够为数字孪生体和物理实体之间的数据交互提供链接,即通过物联网中部署在物理实体关键点的传感器感知必要信息,并通过各类短距无线通信技术(如 NFC、RFID、Bluetooth 等)或远程通信技术(互联网、移动通信网、卫星通信网等)传输到数字孪生体。

#### 4.6 VR、AR、MR

VR、AR、MR 技术是使数字空间的交互更贴近物理实体的实现途径。虚拟现实(Virtual Reality, VR)将构建的三维模型与各种输出设备结合,模拟出能够使用户体验脱离现实世界并可以交互的虚拟空间。增强现实(Augmented Reality, AR)是虚拟现实的发展,其将虚拟世界内容与现实世界叠加在一起,使用户体验到的不仅是虚拟空间,从而实现超越现实的感官体验。混合现实(Mixed Reality, MR)在增强现实的基础

上搭建了用户与虚拟世界及现实世界的交互渠道,进一步增强了用户的沉浸感。

在 VR、AR、MR 技术的支撑下,用户与数字孪生体的交互开始类似与物理实体的交互,而不再仅限于传统的屏幕呈现,使得数字化的世界在感官和操作体验上更接近现实世界,根据数字孪生体制定的针对物理实体的决策将更加准确、更贴近现实。

### 5 数字孪生展望

#### 5.1 面临的挑战

##### 5.1.1 技术方面的挑战

数字孪生的发展在技术方面面临以下 5 项挑战。

a) 数据采集传输及管理的挑战。对于数据采集,主要挑战在于传感器的种类、精度、可靠性、工作环境等受到当前技术发展水平的限制;对于数据传输,主要挑战在于传输的实时性,而目前应用的大多数网络传输设备和网络结构难以满足高级别的传输速率及质量要求;对于数据管理,全生命周期数据管理需要借助于分布式及冗余存储,如何优化数据的分布架构、存储方式和检索方法以获得实时可靠的数据读取性能,是其应用于数字孪生系统面临的挑战。

b) 多尺度融合建模的挑战。首先,现实中的复杂系统往往很难建立精确的数理模型。目前的建模方法大多基于统计学算法将数据转化为物理模型的替代,模型的可解释性不足,难以深度刻画或表征物理实体的机理。如何将高精度传感数据与物理实体的运行机理有效深度结合,获得更好的状态评估和系统表征效果,是构建准确数字孪生模型的关键。其次,高层次的数字孪生系统往往需要对大量不同物理实体进行建模,在将这些不同尺度的模型融合为一个综合的系统级模型时,增加不同模型间的数据接口及数据翻译器,解决模型参数及其格式不一致的问题,同样是数字孪生建模过程中的挑战。

c) 高性能计算的挑战。数字孪生系统各项功能的实现非常依赖高性能的计算能力,对系统所搭载的云计算平台,优化数据结构、算法结构,并配套足够的算力,对部署在终端的边缘计算平台,综合考量算力和功耗的平衡,均是数字孪生系统层面需要面临的挑战。而在服务层面,如今用户所需的人工智能基础设施不足、人工智能应用方案成本过高等也是亟待解决的问题。

d) 虚拟呈现的挑战。如今 VR、AR、MR 技术本身

存在很多亟待突破的瓶颈,而对复杂的数字孪生系统,VR、AR、MR技术难点有2个:一是需要布置大量的高精度传感器采集系统的运行数据,为虚拟呈现提供必要的数据来源和支撑,二是如何将虚拟内容叠加至现实空间并提供沉浸式的虚实交互体验。

e) 系统安全的挑战。数字孪生系统中数字孪生体与物理实体的交互是建立在网络数据传输的基础上的,数字孪生的应用使得企业原有的封闭系统逐渐转变为开发系统,因此系统的安全问题随之而来。首先是数据传输与存储的安全,即在传输及存储的过程中面临数据丢失、数据泄密等风险,其次是数字孪生虚实交互过程中存在安全漏洞,而导致其易受外界攻击,进而引起系统紊乱,影响数字孪生体与物理实体之间的数据信息及控制指令的交互效率。

#### 5.1.2 应用方面的挑战

数字孪生在落地应用方面也面临一定的挑战。

a) 多场景应用的挑战。数字孪生涉及的行业有待继续拓展,目前数字孪生得到实际应用的行业少之又少,主要集中在智慧城市、智能制造等行业。在其他行业数字孪生仍停留在概念及原型设计的阶段。另外数字孪生大规模应用的场景也比较有限,即使是在已经投入实际应用的个别行业中,数字孪生更多是为单一小场景或单个系统服务,如单一建筑或单个机器的数字孪生体,还没有得到大规模场景下的应用。

b) 数字孪生产业链的挑战。具体产业的整条产业链中涉及各种不同职能的主体,通过建立数字孪生产业链能够实现这些主体的跨区域、跨行业、跨企业、跨部门的高效协同与资源优化配置,但目前数字孪生产业链中的各主体尚处于碎片阶段,联系不够紧密,数字化程度较低。

#### 5.2 发展趋势

a) 技术方面。在数字孪生的发展过程中,各项配套关键技术越来越成熟。硬件支持技术的发展能够为系统带来高效率的数据传输能力及高性能的计算能力,软件相关算法及模型的发展能够为系统带来可靠的数据管理能力及深度的模型融合能力,这些都在不同层面推动了数字孪生在各个领域的落地应用,而未来随着新一代信息技术、先进制造技术、新材料技术等系列新兴技术的共同发展,数字孪生将在探索与尝试、优化与完善中进一步发展。

b) 应用方面。随着数字孪生的普及,更多企业能够发掘各类数据的潜藏价值,并据此构建更精细、更

动态的数字化模型。因此从长远来看,数字孪生的应用一方面将向广度发展,即数字孪生将应用到更多的行业,服务更多的场景,另一方面将向深度发展,即贯穿具体产业的整条产业链,全面覆盖上下游各类主体,追求产业的数字化转型。

c) 政策方面。国家对数字孪生相关技术的重视程度在不断提高,未来必会将出台更多鼓励人工智能、云计算、大数据等技术深度发展的政策,这将进一步推动数字孪生不断走向成熟。同时,国家仍将继续推进企业数字化转型的进程,并加深数字经济与实体经济的深度融合,在经济支持政策和技术支持政策的双重红利下,数字孪生也将愈加完善,最终造福于国家和人民。

#### 参考文献:

- [1] 刘大同,郭凯,王本宽,等. 数字孪生技术综述与展望[J]. 仪器仪表学报,2018,39(11):1-10.
- [2] 黄海松,陈启鹏,李宜汀,等. 数字孪生技术在智能制造中的发展与应用研究综述[J]. 贵州大学学报(自然科学版),2020,37(5):1-8.
- [3] 安世亚太. 数字孪生体技术白皮书[EB/OL]. [2021-05-02]. [https://www.sohu.com/a/428812355\\_654086](https://www.sohu.com/a/428812355_654086).
- [4] 中国电子信息产业发展研究院. 数字孪生白皮书(2019)[EB/OL]. [2021-05-02]. <https://www.518doc.com/p-5250.html>.
- [5] 中国信息通信研究院. 中国数字经济发展白皮书[EB/OL]. [2021-05-02]. <https://new.qq.com/omn/20210427/20210427A006OA00.html>.
- [6] 郭亮,张煜. 数字孪生在制造中的应用进展综述[J]. 机械科学与技术,2020,39(4):590-598.
- [7] 陈岳飞,肖珍芳,方向. 数字孪生技术及其在石油化工行业的应用[J]. 天然气化工(C1化学与化工),2021,46(2):25-30.
- [8] 高志华. 基于数字孪生的智慧城市建设发展研究[J]. 中国信息化,2021(2):99-100.
- [9] 张新长,李少英,周启鸣,等. 建设数字孪生城市的逻辑与创新思考[J]. 测绘科学,2021,46(3):147-152,168.
- [10] 李欣,刘秀,万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. 系统仿真学报,2019,31(3):385-392.
- [11] KE S Q, XIANG F, ZHANG Z, et al. A enhanced interaction framework based on VR, AR and Mr in digital twin[J]. Procedia CIRP, 2019(83):753-758.

#### 作者简介:

王巍,工程师,硕士,主要从事通信网络及人工智能技术相关工作;刘永生,高级工程师,博士,中国联通研究院数字技术研究中心人工智能室主任,ITU-T和CCSA标准专家,长期从事通信网络和人工智能技术相关工作;廖军,博士,教授级高级工程师,中国联通研究院数字技术研究中心总监,中国人工智能产业发展联盟标准组副组长,长期从事通信网络和终端智能化研究工作;蔡一欣,工程师,硕士,主要从事数据建模、数据处理等方面研究工作。